

16. Huijun Feng, Lingen Chen, ZhihuiXie, Zemin Ding, Fengrui Sun. Generalized structural optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate // Energy. 2014. Vol. 66. P. 991-998.

17. Shor Ya. B. Statisticheskie metody analiza i kontrolya kachestva i nadezhnosti [Statistical methods of analysis and quality control and reliability]. – M.: Soviet radio, 1962.

18. Pugachev V. S. Teoriya veroyatnoctei i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]. M.: Nauka, 1979.

19. Bitner G. Teoriya veroyatnoctei [Probability Theory]. D: Feniks, 2012.

УДК 669.162.27.003.1

В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, Ю. Н. Чесноков, А. В. Лаптева

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

НДТ ПО ОЦЕНКЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Аннотация

В статье предлагается оценивать наилучшие доступные технологии по значениям следующих технологических чисел: топливного, экологического, амортизационного, парникового и их сумм. Все эти числа имеют энергетическую размерность: т условного топлива / единицу продукции, что позволяет их складывать. Топливное технологическое число характеризует энергоёмкость продукции. Технологическое экологическое число переводит плату предприятия за загрязнение окружающей среды в энергетические единицы. Технологическое амортизационное число переводит амортизационные отчисления из рублей в энергетические единицы. Технологическое парниковое число переводит плату предприятия за выбросы парниковых газов в энергетические единицы. Технологические числа имеют сквозной характер – от добычи сырья до получения готовой продукции. Наилучшие доступные технологии характеризуются наименьшей суммой всех технологических чисел.

Ключевые слова: сквозной энерго-экологический анализ, энергоэкологическая ёмкость производства металлопродукции, технологическое топливно-экологическо-парниковое число, наилучшие доступные технологии, климатическая нейтральность.

Abstract

In article it is offered to estimate the best available technologies for values of the following technological numbers: fuel, ecological, depreciation, greenhouse and their sums. All these numbers have power dimension: t of conditional fuel / unit of production that allows to put them. The fuel technological number characterizes power consumption of production. The technological ecological number transfers a payment of the enterprise for environmental pollution to power units. The technological depreciation number transfers depreciation charges from rubles to power units. The technological greenhouse number translates a payment of the enterprise for emissions of greenhouse gases in power units. Technological numbers have through character – from extraction of raw materials before receiving finished goods. The best available technologies are characterized by the smallest sum of all technological numbers.

Key words: *through power-ecological analysis, power ecological capacity of production of steel products, technological fuel ecological greenhouse number, best available technologies, climatic neutrality.*

Главный вывод, который следует сделать, сравнивая черную металлургию РФ и Европейского Союза (ЕС), состоит в том, что отечественный металлургический комплекс, перейдя в рыночную систему экономических координат, продолжает, вот уже три десятка лет, недооценивать энергоэкологические возможности металлургических технологий. Это мешает обеспечению стабильного снижения энергоэкологичности производства чугуна и стали. В ЕС энергоемкость производства стали около 18 ГДж/т жидкой стали, в РФ этот показатель около 26 ГДж/т. Более того, именно высокая энергоемкость производства черного металла является причиной ряда очевидных отраслевых экологических проблем (парниковый эффект, рост отходов, используемых объемов воды и т.д.). Назрела пора создания наилучшей доступной технологии (НДТ) в виде единой методики по определению в РФ энергоэкологичности производства металлопродукции. В настоящее время в РФ практически каждый автор пользуется своей эксклюзивной методикой определения, как энергоемкости, так и энергоэкологичности.

Климатическая нейтральность – иногда ее называют «углеродный нейтралитет», нулевой чистый показатель или чистый ноль – является ничем иным, как восстановлением баланса на планете, с точки зрения выбросов, и возвращением ее к своему предыдущему состоянию, преобладавшему полтора века назад [1].

В целях дальнейшего развития существующей методики сквозного энергоэкологического анализа (СЭЭА), как и при определении энергоёмкости продукции [2-5], так и определении эмиссии вредных выбросов применен сквозной подход к оценке удельных выбросов парниковых газов. Сквозной анализ означает, что все его параметры определяются с момента добычи и транспортировки ресурсов. Кроме того, также по аналогии с эмиссией вредных выбросов, с целью возможной сравнительной оценки ущерба от выбросов парниковых газов с энергоэкологичностью продукции предложено этот ущерб выражать в энергетических единицах. Это дает возможность сопоставлять ранее определенную энергоёмкость продукции рассматриваемых производств с учетом ущерба от выбросов парниковых газов.

Анализ энергопотребления в технологических процессах существующих методик определения тепловых энергетических балансов отдельно взятых переделов не позволяет найти показатели использования теплоэнергетических ресурсов на конечную продукцию. Здесь требуется проведение сквозных суммарных расчётов энергоёмкости технологического продукта. В наиболее представительном виде такая методика (методика расчёта технологических топливных чисел (ТТЧ)) была детально разработана, далее успешно развивалась и применялась в работах ученых УГТУ-УПИ и Уралэнергочермета (Лисиенко В. Г., Розин С. Е., Щелоков Я. М.) в 80-х годах XX века. Разработанная методика имеет ряд особенностей, отличающих её от других методик и позволяющих объективно проводить энергетический анализ или анализ эффективности использования энергии практически в любом технологическом процессе.

При выборе НДТ и/или при сравнении нескольких НДТ необходимо учитывать многие параметры: энергоемкость, вредные выбросы, выбросы парниковых газов, загрязнение водных ресурсов и др. Можно рассматривать каждый параметр отдельно, но при этом теряется достоверность выбора.

Введены понятия ТТЧ, технологическое экологическое число (ТЭЧ) [2], технологическое амортизационное число (ТАЧ) [5], технологическое парниковое число (ТПЧ) [5] и их комбинации, в каждом показателе использован топливный эквивалент природного газа.

С целью выделения из полной энергоёмкости продукции пока не достоверно определяемую энергоёмкость человеческого труда был введен показатель сквозного энергетического анализа (СЭА) – ТТЧ – равный суммарным расходам всех видов энергии в данном и во всех предшествующих производствах технологических процессов, пересчитанных на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ, образуемых вторичными энергетическими ресурсами (ВЭР). Методика использования ТТЧ процесса позволяет сравнивать удельные энергоёмкости отдельных видов продукции по различным отраслям промышленности, определять основные источники потерь энергии, направления её экономии, объективные результаты энергосберегающих мероприятий в отдельных технологических процессах.

ТТЧ естественного топлива определяется как (далее м^3 даётся при н. у.):

$$\text{ТТЧ} = 1,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г}}^{\text{P}}}{Q_{\text{н.у.т}}^{\text{P}}}, \quad (1)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий добычу, транспортировку и подготовку топлива; 10^3 – коэффициент служит для перевода размерности кг у. т./кг прод. в кг у. т./т прод; $Q_{\text{н.пр.г}}^{\text{P}}$ – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, МДж/ м^3 , $Q_{\text{н.у.т}}^{\text{P}}$ – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива, МДж/кг у. т.

ТТЧ продукта определяется формулой, в которую входит ТТЧ топлива – ресурса (1):

$$\text{ТТЧ}_{\Sigma} = \Sigma \Psi_i \cdot \text{ТТЧ}_i, \quad (2)$$

где Ψ_i – коэффициент расхода i -го ресурса; ТТЧ_i – ТТЧ i -го ресурса, кг у. т./ед. продукта.

Структурированная методика СЭА рассматривает следующий состав ТТЧ [2, 3]:

$$\text{ТТЧ} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_1 – энергия ископаемого топлива (кг у. т./ед. прод.) с учетом затрат на его добычу, подготовку или обогащение, транспортировку и др.; \mathcal{E}_2 – производная энергия, например, электроэнергия, пар, компрессорный воздух, кислород и т.п.; \mathcal{E}_3 – скрытая энергия в исходных материалах, оборудовании, капитальных сооружениях данного процесса, а также в операциях по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии, например, ремонты и т.п.; \mathcal{E}_4 – энергия вторичных энергетических ресурсов (коксовый, доменный газ и т. п.).

Параметр ТАЧ при расчетах ТТЧ учитывает затраты на амортизацию оборудования, представленные в энергетических единицах, израсходованных в

предыдущих процессах – Э₃. В методике СЭЭА предложено приводить амортизационные отчисления (АО) к энергетической форме с помощью ТАЧ. По определению, ТАЧ – это количество энергии (кг условного топлива, ГДж), эквивалентной величине АО на единицу выпускаемой продукции и используемой при определении величины Э₃ для учета степени износа оборудования в каждом технологическом переделе. Значение ТАЧ рассчитывается по формуле

$$\text{ТАЧ} = \frac{A}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}}, \quad (4)$$

где A – величина АО в денежном эквиваленте, \$ США/ед. прод., $C_{\text{пр.г.}}$ – цена природного газа; \$ США/м³. Величина $C_{\text{пр.г.}}$ принята равной 0,55 \$ США/м³; $Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}} = 35,8$ МДж/м³, $Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}} = 29,33$ МДж/кг у. т. С учетом численных значений $\text{ТАЧ} = 2,231 \cdot A$ кг у.т./ед. прод.

В работе Роменца В. А. [6] приведены данные по амортизационным расходам для некоторых переделов. Там же приведена цена природного газа, действующая в то время – $C_{\text{пр.г.}} = 0,08$ \$ США/м³. С учетом этих данных в таблице 1 приведены значения ТАЧ для различных переделов черной металлургии.

Таблица 1

Значения ТАЧ для доменной печи и четырех переделов черной металлургии

Параметры	Передел				
	Доменная печь	Ромелт	Midrex	HyL-3	Corex
АО, \$ США/т прод.	3,62	4,36	8,04	10,05	10,72
ТАЧ, кг у. т./т прод.	55,3	66,6	122,8	153,5	163,7

Полученные значения ТАЧ составляют от 55,3 кг у. т. (1,62 ГДж) до 163,7 кг у. т. (4,796 ГДж) на единицу готовой продукции. АО на единицу выпускаемой продукции, на основе которых рассчитывалось ТАЧ, имеют значения от 3,62 \$ США до 10,72 \$ США, как в условиях ЕС, так и РФ. Приведенные данные являются обобщенными показателями, конкретные значения будут зависеть от состояния, степени использования оборудования, соблюдения технологических режимов его работы.

ТАЧ доменной печи имеет наименьшее значение, так как доменная печь имеет «большой межремонтный период, способность непрерывно работать годами без остановок на ремонт».

СЭА получил дальнейшее развитие с разработкой методики комплексного СЭЭА для энерготехнологических объектов и процессов.

Методика энергетического анализа была существенно усовершенствована и дополнена методикой экологического анализа, что и составило ядро, так называемого, интегрированного СЭЭА.

В СЭЭА введено представление о ТЭЧ. ТЭЧ определяется как:

$$\text{ТЭЧ} = m_{\text{п}} \cdot K_{\text{вэ}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{п}}$ – удельная приведенная масса вредных выбросов (т у. выбр./ед. прод.); $K_{\text{вэ}}$ – условный показатель, характеризующий степень компенсации экологического

ущерба в кг у. т./т у. выбр. Согласно [2] величина m_{Π} может определяться формулой:

$$m_{\Pi} = \sum_k (M_k \cdot A_k),$$

где M_k – фактическая удельная масса вредных выбросов k -го загрязняющего вещества, т выбр./ед. прод. для i -го передела; A_k – коэффициент агрессивности k -го загрязняющего вещества, т у. выбр./т выбр.

Величина A_k на каждой иерархической ступени для одних и тех же вредных выбросов может изменяться, так как для локального воздействия на значения A_k больше влияют санитарно-гигиенические нормативы, для удаленного – экологические. Коэффициент перевода $K_{вэ}$ стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах равен

$$K_{вэ} = \frac{C_{в.в.}}{C_{пр.г}} \cdot \frac{Q_{нпр.г}^P}{Q_{н.у.т}^P},$$

где $C_{вв}$ – плата природопользователя за сверхлимитное загрязнение окружающей среды, \$ США/т у. выбр. В качестве нормирующего эквивалента могут использоваться различные виды топлива: нефтяной, дизельный, газовый. Для РФ целесообразно применять газовый эквивалент, т. е. за стоимость топлива принята цена природного газа. Величина $C_{вв}$ принята равной 0,045 \$ США/т у. выбр. В результате величина измерения ТЭЧ – кг у. т./ед. прод. С учетом численных значений $K_{вэ} = 0,101$ кг у. т./т у. выбр.

Параметры ТТЧ и ТЭЧ имеют одинаковую размерность, поэтому было введено понятие технологического топливно-экологического числа (ТТЭЧ) – итоговая оценка энергоэкологических затрат при производстве продукции в кг у. т./ед. прод.:

$$ТТЭЧ = ТТЧ + ТЭЧ. \quad (6)$$

Чем меньше эта сумма, тем лучше энергоэкологические параметры анализируемого технологического процесса. Сквозные энергетические затраты рассчитываются в форме ТТЧ.

Формула (6) расширена и представлена в виде технологического топливно-экологическо-парникового числа (ТТЭПЧ), которое представляет оценку климатической нейтральности производства продукции черной металлургии:

$$ТТЭПЧ = ТТЧ_{\Sigma} + ТЭЧ + ТПЧ = \sum \Psi_i \cdot ТТЧ_i + ТАЧ + ТЭЧ + ТПЧ, \quad (7)$$

где $ТТЧ_{\Sigma}$ – суммарное ТТЧ. Введение новых понятий ТАЧ и ТПЧ усовершенствовало методику сквозного энергоэкологического и парникового анализа. ТТЭПЧ определяет сквозную энергоэкологическую и парниковую характеристику процесса. Чем меньше значение ТТЭПЧ у процесса, тем меньше его энергоёмкость и меньший ущерб он наносит окружающей среде. По этому параметру целесообразно выбирать НДТ для внедрения.

Определение и анализ величин ТЭЧ был приведен в ряде предыдущих работ [2]. По этой причине формулу (7) можно было упростить и рассматривать технологическое топливно-парниковое число (ТППЧ) как показатель климатической нейтральности производства любой металлопродукции:

$$ТППЧ = ТТЧ_{\Sigma} + ТПЧ. \quad (8)$$

Расчеты ТТЧ технологических процессов с выходом продукта в виде сырой стали обобщены в таблице 2. При этом в соответствии с [7] величина сквозной энергоёмкости определялась по формуле (3) как ТТЧ в составе первичной, производной, скрытой энергии и энергии ВЭР.

Таблица 2

Ранжирование процессов по энергоёмкости стали

Ранг по ТТЧ	Технологическая цепь	Передел	ТТЧ продукта, кг у. т./т	Составляющие ТТЧ, кг у. т./т			
				Э ₁	Э ₂	Э ₃	Э ₄
1	ЭДП на ломе	ЭДП	441,0	30	242	147	0
2	HyL-3 + ЭДП	HyL-3	769,5	458	40	294	0
		ЭДП	629,7	29	209	392	0
3	Corex + ЭДП	Corex	931,0	1 010	163	353	–592
		ЭДП	632,3	29	148	445	0
4	Доменная печь + ЭДП	Доменная печь	936,0	749	181	240	–234
		ЭДП	633,8	29	158	446	0
5	Midrex + ЭДП	Midrex	798,4	458	45	295	0
		ЭДП	639,2	29	209	401	0
6	Ромелт + ЭДП	Ромелт	1 078	1 154	–249	172	0
		ЭДП	680,6	29	158	493	0
8	Доменная печь + кислородный конвертер	Доменная печь	936,0	749	181	240	–234
		Кислородный конвертер	916,6	0	14,5	902	0

Вторичные ресурсы Э₄ имеют отрицательные значения, это показывает особую роль ВЭР в суммарном объеме энергоёмкости продукции, в зависимости от структуры топливно-энергетического баланса конкретной технологической схемы.

Сравнение процессов по получению чугуна и железа показало, что структура их энергетических затрат имеет значительные отличия (таблица 2). Скрытая энергия (Э₃) имеется в балансах всех сравниваемых процессов. Причем преобладает этот вид энергии в доменной печи, Midrex, HyL-3. Минимально энергоёмкими процессами являются Midrex и HyL-3. В таблице 2 технологические цепи расположены по увеличению значений ТТЧ. Как видим, наиболее приоритетными процессами по значению ТТЧ являются сочетания переделов HyL-3 + ЭДП и ЭДП на ломе.

По аналогии с ТТЧ и ТЭЧ введено понятие ТПЧ технологического процесса и продукта (сквозное ТПЧ). ТПЧ определяется количеством кг у. т., необходимого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых

газов на единицу выпускаемой продукции. ТПЧ преобразует рубли в кг у. т., т.е. экономические параметры в энергетические. Это позволяет говорить об энергетической экономике, которая оперирует более стабильными величинами. При этом за стоимость топлива принята цена природного газа [7]:

$$\text{ТПЧ}_{Pi} = K_{\text{вп}} \cdot \sum_{k=1}^N M_k^{n.z.}, \quad (9)$$

где $K_{\text{вп}}$ – коэффициент перевода стоимостной оценки ущерба к оценке в условных энергетических единицах (кг у. т./т п. г.); $M_{kп.г.}$ – фактическая удельная масса выбросов парниковых газов, т выбр./ед. прод. для i -го передела; N – количество учитываемых парниковых газов (здесь учитывается эмиссия только диоксида углерода, т. е. $N = 1$). Величина $K_{\text{вп}} = K_{\text{вз}}$. Коэффициент $K_{\text{вп}}$ представляется в виде:

$$K_{\text{вп}} = \frac{C_{\text{п.г.}}}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^p}{Q_{\text{н.у.т.}}^p} \quad (10)$$

где $C_{\text{п.г.}}$ – плата за эмиссию парниковых газов природопользователя за загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу парниковых газов, принято значение 0,045 \$ США/т п. г. В результате размерность ТПЧ – кг у. т./ед. прод. С учетом численных значений $K_{\text{вп}} = 0,101$ кг у. т./т п. г.

Таким образом, ТПЧ для процессов черной металлургии однозначно определяется эмиссией диоксида углерода.

В обобщенном виде величина климатической нейтральности производства продукции черной металлургии представлена в таблице 3.

Таблица 3

Составляющие показателя климатической нейтральности
производства металлопродукции

	Показатель	Определение	Формула
ТТЧ	технологическое топливное число	суммарные расходы всех видов энергии в данном и во всех предшествующих производствах технологических процессов, пересчитанных на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ, образуемых ВЭР	$\text{ТТЧ} = 1,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^p}{Q_{\text{н.у.т.}}^p}$ $\text{ТТЧ}_{\Sigma} = \sum \Psi_i \cdot \text{ТТЧ}_i$
ТАЧ	технологическое амортизационное число	количество кг у. т., эквивалентной величине амортизационных отчислений на единицу выпускаемой продукции и используемой при определении величины Δ_3 для учета степени износа оборудования в каждом технологическом переделе	$\text{ТАЧ} = \frac{A}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^p}{Q_{\text{н.у.т.}}^p}$

ТЭЧ	технологическое экологическое число	количество кг у. т., необходимое для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов вредных выбросов на единицу выпускаемой продукции	$TЭЧ = \frac{C_{в.в.}}{C_{пр.г.}} \cdot \frac{Q_{н.пр.г.}^P}{Q_{н.у.т.}^P} \cdot \sum_{k=1}^N (M_k \cdot A_k)$
ТПЧ	технологическое парниковое число	количество кг у. т., необходимое для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции	$ТПЧ = \frac{C_{п.г.}}{C_{пр.г.}} \cdot \frac{Q_{н.пр.г.}^P}{Q_{н.у.т.}^P} \cdot \sum_{k=1}^N M_k^{n.г.}$

Таким образом, предложен критерий для выбора НДТ (формула (7)) в виде единой методики по определению в РФ энергоэкологичности производства металлопродукции. Эта методика позволяет проведение сквозных суммарных расчётов ресурсоёмкости технологического продукта в зависимости от поставленной задачи:

- в виде энергоёмкости (формулы 1, 2);
- в виде энергоэкологичности (формула 6);
- в виде показателя климатической нейтральности производства металлопродукции (формула 7).

Список использованных источников

1. Щелоков Я.М. Актуальность наилучших доступных технологий для теплоснабжения в ЖКХ // Энергосбережение. 2018. № 2. С. 16-20.
2. Лисиенко В.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности: монография / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
3. Лисиенко В.Г. Методика расчета и использование технологических топливных чисел / В.Г. Лисиенко, С.Е. Розин, Я.М. Щелоков // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 1987. № 2. С. 108-112.
4. Щелоков Я.М. Об энерготехнологической производительности сталеплавильных производств // Сталь. 1988. № 9. С. 20-21.
5. Лисиенко В.Г. Оценка энергоэффективности альтернативных бескокс-овых металлургических технологий / В.Г. Лисиенко, А.Е. Пареньков, А.В. Лаптева // Сталь. 2009. № 2. С. 72-77.
6. Роменец В.А. Процесс Ромелт: учеб. для вузов / В.А. Роменец [и др.]; под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.
7. Лисиенко В.Г. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескокс-овых процессов производства чугуна и стали / В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, А.В. Лаптева // Металлург. 2011. № 7. С. 40-45.